

탄소섬유시트로 보강한 RC보의 단부 정착유무에 따른 휨성능 평가

Evaluation of Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Carbon Fiber Sheet Considering End Anchorage Effect

이창현¹, 어석홍^{2*}

Chang-Hyun Lee¹, Seok-Hong Eo^{2*}

〈Abstract〉

In this paper, the results of an experimental study were presented by measuring and comparing the flexural strength and deformation on the carbon fiber sheet strength reinforced concrete beam considering end anchorage effect. For this purpose, total six specimens of 100x100x600mm size were prepared and tested according to the KDS 14 20 20. The specimens were categorized in three cases as reference beams without strengthening, beams carbon fiber strengthened but not anchored and beams carbon fiber strengthened also anchored. Experimental results showed that the end anchorage contributed to increase the flexural strength about 42% greater than that of carbon fiber sheets alone, and the number and width of cracks were relatively increased. The results support a considerable effects of end anchorage for carbon fiber strengthened reinforced concrete beams in enhancing the flexural performance. Further studies are needed in durability and long term behavior of carbon fiber sheet strengthened reinforced concrete beams.

Keywords : Flexural Strength Test, Carbon Fiber Sheet, Anchorage Effect, Flexural Strength, Deflection, Crack

1 정회원, 한국인프라관리(주)
2* 정회원, 창원대학교 스마트그린공학부
E-mail: esh@changwon.ac.kr

1 Assistant Manager, Korea Infra Management Co. Ltd.
2* Professor, Changwon National University

1. 서론

토목공학 분야에서 이용되는 재료로 여러 종류의 재료들이 있다. 무근 콘크리트, 철근 콘크리트, 강재 등의 여러 종류의 재료들이 있다. 특히 철근 콘크리트는 다른 재료에 비해 비교적 높은 내구성을 가지고 있으며 경제적이므로 가장 널리 쓰여지고 있다. 철근 콘크리트는 건설구조물의 대표적인 재료임에 따라 항시 외부에 노출되어 있으며, 외부의 영향을 받는다[1-4]. 그 중, 보의 휨 변형은 콘크리트와 철근에 축 방향 응력을 발생시킬 뿐 아니라 보강철근과 콘크리트 사이에도 부착응력을 발생시킨다. 만약에 이 부착응력의 크기를 제한하지 않으면 보강철근을 둘러싼 콘크리트에 분쇄 및 찢어짐 파괴가 일어나기 쉽다. 콘크리트가 파괴되면 보강 철근이 매립된 콘크리트에서 빠질 수 있다. 만약 철근이 콘크리트 사이에서 빠지게 되면 보강철근의 응력은 완전히 잃게 되어서 철근과 콘크리트 사이의 복합작용을 상실한다. 보강철근이 완전하게 부착응력을 잃게 되면 철근 콘크리트 보는 마치 무보강 보와 같이 거동하여 보에 휨 균열이 발생시 무너지게 될 것이다[5-8]. 따라서 각종 열화요인으로 노후화된 철근콘크리트 구조물의 내력을 증가시키는 공법으로 탄소섬유보강공법이 널리 사용되고 있다. 하지만 탄소섬유를 인장부분에 일방향으로 배열시킴과 동시에 양단부분에 휘감음으로써 정착효과를 발휘시키게 하는 정착유무에 따라 구조물의 강성과 일체성이 크게 좌우된다. 본 연구에서는 탄소섬유 보강공법을 사용한 철근 콘크리트 휨부재의 단부정착 유무에 따른 휨강성과 처짐 그리고 휨강도 등 휨성능을 실험을 통해 평가하기 위한 기초적인 연구자료를 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 개요

탄소섬유시트에 의한 보강 효과를 파악하기 위하여 동일한 배합의 습윤양생 기간을 거친 6개의 공시체를 제작한 후 3가지의 경우로 나누어 실험을 수행하였다. 각각의 경우는 무보강 기준공시체, 탄소섬유시트를 보 하단에만 부착하고 단부정착은 하지 않은 공시체, 탄소섬유시트를 보 하단에 부착보강함과 동시에 양단부 10cm폭에 대하여 탄소섬유시트로 휘감아 정착효과를 발휘한 공시체 3가지의 경우로 나누어 탄소섬유시트 보강 유무 및 정착효과 발휘유무를 주요 변수로 설정하였다. 탄소섬유시트 보강은 실험체 표면 그라운드링 처리 후 프라이머를 도포한 후, 탄소섬유시트를 부착한 후 레진 도포로 마무리 하였다.

2.2 사용재료

본 실험에서는 KS L 규정에 적합한 국내 D사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 혼화재는 사용하지 않았다. 콘크리트의 배합은 W/C비 약

Table 1. Mix-proportions of concrete.

W/C (%)	S/A (%)	Unit weight of concrete (kg/m^3)			
		W	C	S	G
50	58	201	400	590	1022

W/C: Water-Cement Ratio, S/A: Fine Aggregate Percentage, W: Water, C: Cement, S: Sand, G: Gravel

Table 2. Material properties of carbon fiber

Carbon Fibers(SK-300), t=1mm	
Design Tensile Strength (kg/m^2)	35,500
Design Modulus of Elasticity (kg/m^2)	2.35×10^6

50%, 굵은골재의 최대치수는 25mm로 설정하였으며, 총 14일간 표준양생을 실시한 후 KS F 2453에 의한 평균 압축강도는 약 27MPa로 측정되었다.

인장 주철근은 2-D10(SD300)을 사용하였으며, 탄소섬유시트는(SK-N300)을 사용하여 기제작한 RC보의 밑면과 양단부 10cm를 보강하였다. Table 1, Table 2에 콘크리트 배합표 및 탄소섬유의 재료 특성을 각각 나타내었다.

2.3 실험체의 제작

본 실험에 사용된 시험체는 탄소섬유시트 보강유무에 따라 Fig. 1~Fig. 3과 같이 높이 100mm, 폭 100mm, 길이 600mm 크기의 각주형 공시체이며, 단부의 정착 및 부차파괴를 방지하기 위해 90° 구부린 철근을 인장철근으로 배치하였다

탄소섬유시트로 인한 정착에 따른 힘 강도의

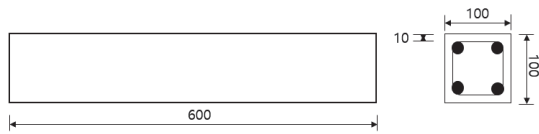


Fig. 1 Dimension of RC beam

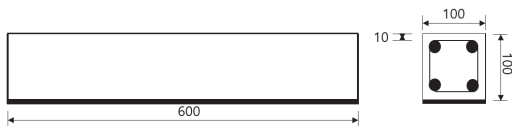


Fig. 2 Dimension of RC beam strengthened by carbon fiber sheet

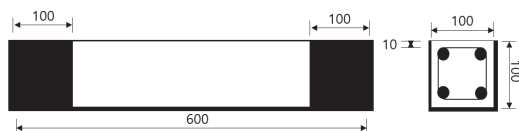


Fig. 3 Dimension of RC beam strengthened by carbon fiber sheet and end anchorage

차이를 알아보기 위해 Table 3과 같이 실험변수를 구분하여 나타내었다.

Table 3과 같은 탄소섬유시트의 보강 유무 및 탄소섬유시의 단부정착 유무에 따른 철근콘크리트의 보강 효과를 알아보기 위한 실험을 3단계로 나

Table 3. Division of test specimens

Specimen	Comments
A	RC Beam without Carbon Fiber Sheet
B	
C	Strengthened RC Beam with Carbon Fiber Sheet
D	
E	Strengthened RC Beam with Carbon Fiber Sheet and U-Shaped Band
F	



Fig. 4 Test specimens after removal of forms

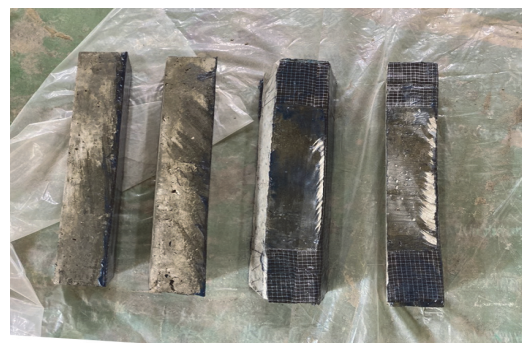


Fig. 5. Test specimens strengthened with carbon fiber sheet



Fig. 6 Flexural strength test

누어 진행하였다. 1단계는 동일한 배합비를 이용하여 시험체를 타설하고 습윤양생을 실시하여 Fig. 4와 같이 보 시험체를 만들었다. 2단계에서는 탄소섬유시트를 이용하여 Fig. 5와 같이 보강을 실시하였다. 3단계에서는 Fig. 6과 같이 3점휨시험법으로 재하시험을 실시하였고, 재하 시 응력 증가는 $0.06 \pm 0.04 \text{ N/mm}^2$ 의 일정한 속도로 하중을 가하여 시험하였으며, 균열발생 하중, 최대하중 및 하중-변위 곡선을 측정하여 그 결과를 비교 분석하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 하중-변위 관계

Table 3의 각 실험변수에 대하여 동일한 2개 시험체의 하중-변위 관계를 6mm까지 약 1mm 간격으로 측정하여 Fig. 7과 같이 나타내었다.

보의 하중-변위 곡선으로부터 보강하지 않은 기준시험체(A, B)와 탄소섬유 보강(C, D) 및 단부 정착한 보(E, F)는 현저한 휨강성의 차이를 보이면서 약 0.8mm 이내의 처짐까지 선형적 거동을 보이다가 그 이후 점차 비선형 거동을 나타내었다. 또한, 선형으로 거동하는 약 0.6~0.8mm의 처짐

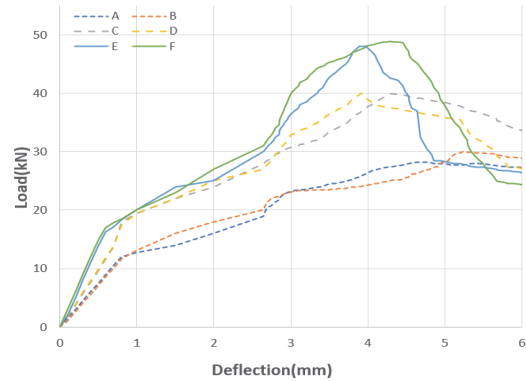


Fig. 7 Load-deflection curves

까지는 보강시험체 C, D와 E, F가 단부정착 유무에 무관하게 유사한 하중저항효과를 나타내다가 주철근이 항복한 이후에는 단부정착에 따른 하중저항효과가 다소 증진되는 것으로 나타났다.

부착보강을 실시한 시험체 C, D의 경우 3.92mm의 처짐과 40.01kN의 최대하중을 나타낸 후 하중이 점진적인 감소를 보였으며 최대하중점에서 무보강 시험체보다 37.1%의 하중저항 증진효과를 나타내었다. 최대하중점 이후에는 부착된 탄소섬유시트가 콘크리트의 경계면에서 박리파괴로 인해 떨어진 것을 의미하며 처짐 5mm 이후에는 무보강 보의 거동과 유사하게 완만한 하중의 감소를 보였다.

정착효과를 발휘한 시험체 E, F의 하중-변위 곡선 또한 초기의 하중은 매우 급속하게 증가하여 약 0.6mm의 처짐에서 현저한 비선형 거동을 보였으며, 그 후 하중이 증가함에 따라 변위 4.29mm일 때 약 48.96kN의 최대하중을 나타내어 무보강 기준시험체 A, B 보다 평균 66.5% 보강시험체 C, D 보다 평균 21.4%의 하중저항효과를 나타내었으나 최대하중점 이후 급격한 취성파괴의 경향을 보였다.

3.2 균열하중, 최대하중 및 휨강성

탄소섬유시트를 이용하여 보강을 실시한 각 시

Table 4. Flexural strength of the test specimens

Specimen	Pre-cracking Stage			Post-yielding Stage		
	Crack Load (kN)	Defelct. (mm)	Flexural Rigidity (kN/mm)	Maximum Load (kN)	Deflect. (mm)	Flexural Rigidity (kN/mm)
A	12.06	0.79	15.27	28.21	4.72	4.11
B	11.60	0.83	13.98	30.07	5.24	4.19
C	13.71	0.71	19.31	39.92	4.33	7.24
D	14.02	0.76	18.45	40.01	3.92	8.22
E	16.32	0.64	25.5	48.05	3.92	9.67
F	17.11	0.61	28.05	48.96	4.29	8.65

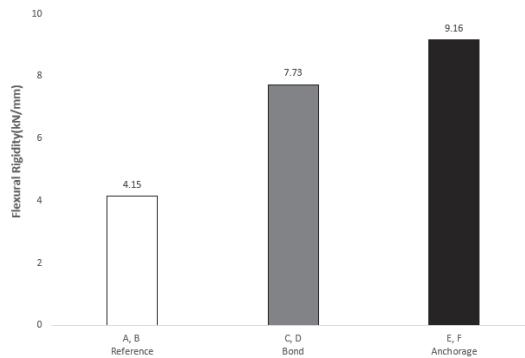


Fig. 8 Flexural rigidity of test specimens

험체의 균열발생하중, 최대하중 및 휨강성의 변화를 Table 4에 정리하였으며 균열발생 이후 휨강성의 변화를 Fig. 8에 나타내었다.

3.3 시험체의 파괴 및 균열 양상

3.3.1 시험체의 파괴양상

일반적으로 탄소섬유시트와 탄소섬유판으로 보강된 휨 부재의 파괴는 여러 가지 양상으로 나타날 수 있으며, 이러한 파괴양상 중 본 연구에서 주로 나타난 파괴양상을 살펴보면, 중앙부에서의 탄소섬유의 인장, 좌측부 탄소섬유시트 박리의 파괴양상을 보였다. 실험결과를 Fig. 9~Fig. 14에 나타내었다.

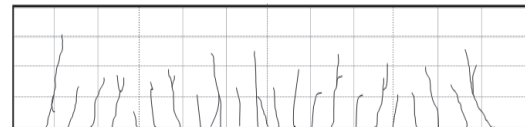


Fig. 9 Cracking pattern of reference specimen



Fig. 10 Cracking picture of reference specimen

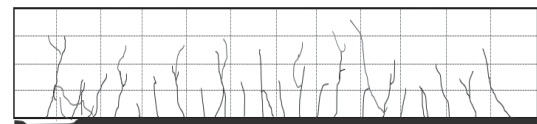


Fig. 11 Cracking pattern of specimen strengthened with carbon fiber sheet



Fig. 12 Cracking picture of specimen strengthened with carbon fiber sheet

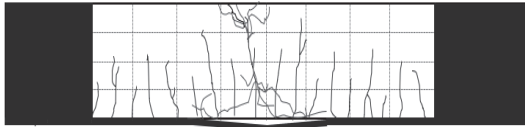


Fig. 13 Cracking pattern of specimen strengthened with carbon fiber sheet and end anchorage



Fig. 14 Cracking picture of specimen strengthened with carbon fiber sheet and end anchorage

3.3.2 무보강 시험체의 파괴형태

시험체 A, B는 시험체에 하중을 가하면 보의 초기 휨 균열이 휨 영역 중앙부에서 발생하기 시작하여 하중의 증가로 인장철근의 항복과 함께 휨 균열이 압축부로 연장되어 파괴에 이르는 의한 전형적인 연성파괴 형태를 보였으며, 이를 Fig. 9(시험체A), Fig. 10(시험체B)에 각각 나타내었다.

3.3.3 보강 시험체의 파괴양상

시험체 C, D의 경우 초기에는 중앙 하단부에서 휨 균열이 시작되어 점차 단부 쪽으로 진행되었다. 항복하중 상태에서부터 중앙부에서 시작되는 균열이 좌측 단부 쪽에서도 증가하는 양상을 보였고, 항복 후 미세한 파단음과 함께 좌측 단부에서 소량의 탄소섬유시트의 박리파괴가 발생하였다. 이는 탄소섬유시트 보강재와 콘크리트 모재와의 강성 차이에 의한 부착력 소실이 그 원인인 것으로 판단된다.

3.3.4 보강 및 정착 시험체의 파괴양상

시험체 E, F의 경우에는 재하초기에 보강 시험체와 유사하게 중앙 하단부의 균열발생 양상을 보이다가 하중이 증가함에 따라 점차 휨 균열의 수

가 증가하였으며, 중앙 하단부의 균열 폭도 늘어났다. 이는 보의 단부에 10mm 폭으로 탄소섬유시트를 휘감아 정착시킴으로써 보강재와 모재와의 일체적인 거동을 가능하게 되어 단부의 박리파괴 억제와 강성증진에 크게 기여하는 것으로 판단된다.

결과적으로 시험체 A, B(무보강), C, D(부착보강), E, F(정착보강) 3가지의 경우를 비교해 보았을 때 탄소섬유시트를 하단에만 부착하였을 경우 무보강 시험체의 경우보다 휨강도 증진에 크게 기여하지만 단부를 정착하지 않음으로써 탄소섬유시트가 박리하는 현상을 확인할 수 있었다. 이에 비하여 탄소섬유시트를 보의 단부에 정착보강한 시험체의 경우에는 단순히 부착보강한 시험체의 경우보다 단부의 박리현상을 억제하여 최대하중 및 휨강성이 점진적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 탄소섬유시트를 기존의 철근콘크리트 부재 양단부에 정착하여 보강한 후 하중재하 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 탄소섬유시트 부착보강을 한 시험체와 단부 정착을 동시에 실시한 시험체의 경우 최대 하중점에서의 변위는 무보강 기준시험체에 비하여 17% 작게 발생하였으며, 최대하중은 각각 37.1%와 66.5% 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 단부 정착보강한 경우 단순히 하면 부착보강한 경우에 비하여 21.4%의 하중증가를 보였다.
2. 탄소섬유시트 부착으로 보강을 실시한 경우 보강을 실시하지 않은 경우에 비해 평균 86.2%의 강성도 증진 효과를 보였고, 탄소섬유시트 정착과 함께 보강을 실시한 경우

에는 평균 120%의 강성도 증진효과를 나타내어 기존 철근콘크리트 구조물의 탄소섬유 보강시 단부의 정착효과가 매우 중요하다는 사실을 보여주었다.

3. 무보강 시험체의 경우 휨균열의 발생과 인장 철근의 항복에 이은 전형적인 연성 파괴 양상을 보였으며, 탄소섬유시트 부착보강을 한 경우와 단부 정착을 동시에 실시한 경우에는 재하초기에 비슷한 균열발생 양상을 보였으나 하중이 증가함에 따라 단부정착에 따른 일체적거동으로 최대하중 및 휨강성도 증진효과가 뚜렷한 것으로 나타나 탄소섬유부착시 단부 정착이 매우 중요함을 알 수 있었다.

사 사

본 논문은 2021~2022년도 창원대학교 교내공모과제 연구비지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- [1] Seong-Hwi Song, "An Analytical Study on the Earthquake-Resistance Capacity of RC Columns Reinforced with Carbon Fiber Sheet", M.S. Thesis, Hanyang University, Feb, (2020).
- [2] Chi-Moon Won, "Experimental Study about Flexural Strengthening Effects According to Developmmt Method of Carbon Fiber Sheet for Reinforced Concrete Beam", Journal of the

- Korea Structural Maintenance Inspection Institute, Vol. 10, No. 4, pp. 119-126, (2006).
- [3] Seong-Do Kim, "Flexural Behaviors of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets", Journal of the Korea Computational Structural Engineering Institute, Vol. 23, No. 2, pp. 227-234, (2010).
- [4] Hee-Man Park, "An Experimental Study of the Flexural Strengthening Efect on Recycled Coarse Aggregate RC Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets", M.S. Thesis, Kumoh National Institute of Technology, DEC, (2012).
- [5] Jong-Sup Park, Woo-Tai Jung, Young-Jun You, Young-Hwan Park, "An Estimate of Flexural Strength for Reinforce Concrete Beams Strengthened with CFRP Sheets", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 17, No. 2, pp. 213-220, (2005).
- [6] Chang-Hyun Lee, Seok-Hong Eo, "Flexraul Strength and Durability Evaluation by Freezing and Thawing Test of Repaired Reinforced Concrete Beams", Journal of the Korea Contents Association, Vol. 18, No.1, pp. 455-461, (2018).
- [7] Jeong-Won Park, Sang-Yeol Park, Chang-Sik Min, "An Experimental Study of Flexural Repair Reinforced Concrete Beams with the CFRP Sheet", Journal of the Korea Concrete Institute, pp. 781-786, Spring, (2000).
- [8] Tae-Hyo Park, Jun-Seong Bu, "Flexural Analysis of RC Beams Strengthened with Soffit and Web Fiber Sheets", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 22, No. 5-A, pp. 1045-1057, (2002).